

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220828001

大件车作用下独柱墩弯桥倾覆风险快速预测*

徐康, 王涛, 刘博, 陈淑君

(长安大学公路学院, 陕西西安 710064)

摘要: 为了实现大件运输车辆作用下独柱墩弯桥倾覆风险的快速预测, 首先对基于刚体转动理论的简化计算方法进行改进, 引入车辆转弯模型考虑车轮轨迹, 实现车辆荷载的准确和快速加载, 定义了稳定因子 η 并提出质心加载法用于确定倾覆轴线; 结合变形体理论, 提出采用端点偏移的方法对倾覆轴位置进行修正; 采用阈值法快速评价桥梁的倾覆风险性, 并通过建立ABAQUS实体模型分析了大量桥梁的倾覆过程, 确定阈值 $[k_c]$ 的取值; 在此基础上建立了独柱墩弯桥倾覆风险快速预测流程。研究表明: 大件车以稳定状态通过弯桥时其质心轨迹为一圆弧; 对倾覆轴线位置进行修正可以考虑主梁变形能力对稳定效应的削减, 相比于原简化方法, 由改进方法计算的抗倾覆稳定能力 k_c 对桥梁的倾覆风险具有更强的表征能力; 抗倾覆稳定能力阈值取值为1.10; 基于MATLAB程序语言, 编制了弯桥倾覆风险快速预测程序, 通过批量输入大件车待通行线路上的独柱墩弯桥信息即可计算出各个桥梁的抗倾覆稳定能力 k_c , 将 k_c 与抗倾覆能力阈值进行比较从而预测出有倾覆风险的桥梁, 实现大件车作用下独柱墩弯桥倾覆风险快速预测。

关键词: 桥梁工程; 倾覆风险预测; 独柱墩梁桥; 刚体转动; 变形体转动; 大件运输车辆

中图分类号: U441.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)03-0474-10

Fast Prediction of Overturning Risk of Single-pilar Pier Curved Girder Bridge under the Action of Customized Transport Vehicle

XU Kang, WANG Tao, LIU Bo, CHEN Shujun

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to expedite the prediction of overturning risk for single-pillar pier curved girder bridges subjected to custom transport vehicle loads, several modifications and advancements have been made in the calculation approach. Initially, we improved a simplified calculation method, drawing on rigid body rotation theory, and introduced a vehicle turning model to account for wheel tracks, thereby achieving accurate and rapid loading of vehicle load. We defined the stability factor η and proposed the centroid loading method to determine the overturning axis. In conjunction with the deformation theory, we presented the end-point migration method to adjust the position of the overturning axis. Rapid evaluation of bridge overturning risk was performed using the threshold method, and the threshold value $[k_c]$ was identified by analyzing the overturning process of numerous bridges via established ABAQUS solid models. This facilitated the construction of an overturning risk prediction pro-

* 收稿日期: 2022-08-28; 修回日期: 2022-09-30

基金项目: 国家自然科学基金(51878058)、国家重点研发计划项目(2019YFB1600702)资助

作者简介: 徐康(1997—), 男, 硕士研究生。主要从事独柱墩曲线梁桥抗倾覆研究。E-mail: surcondear@chd.edu.cn

cess for single-pillar pier curved girder bridges. Our results indicated that in a steady state, the centroid path of a custom transport vehicle navigating a curved bridge is an arc. Furthermore, adjusting the position of the overturning axis accounts for the reduction in the stability effect caused by the main beam's deformation capacity. Compared to the original simplified method, the improved method's calculated anti-overturning stability capacity k_c provides a more robust characterization of bridge overturning risk. Notably, the k_c threshold can be 1.10. Finally, utilizing the MATLAB programming language, we developed a program for rapidly predicting the overturning risk of curved bridges. By inputting the information for batches of single-pillar pier curved girder bridges along the routes intended for custom transport vehicles, the bridges' anti-overturning stability capability k_c can be calculated. By comparing k_c with the threshold value, we can predict which bridges carry an overturning risk, enabling rapid prediction of overturning risk for single-pillar pier curved girder bridges under the action of custom transport vehicles.

Keywords: bridge engineering; overturning risk prediction; single-pilar pier curved girder bridge; rigid body rotation; deformable body rotation; customized transport vehicle

0 引言

独柱墩因其造型美观和占地面积小等优点得到了广泛运用,尤其在城市高架桥和高速公路立交匝道桥上更是常见。但2007年至2019年,我国发生了多起独柱墩桥梁整体倾覆事故^[1],对人民生命安全和公共财产造成了严重威胁。2021年12月,一辆载有换热器油箱的大件运输车辆(车辆主体总重达198吨,后跟两辆重30吨的牵引车),在湖北省境内大广高速与沪渝高速花湖互通枢纽匝道桥梁上行驶时导致该桥梁倾覆(图1)。而近年来大件运输车辆通行频率越来越高,货物重量越来越大^[2],对独柱墩桥梁的抗倾覆能力提出了更大的挑战。

国内外学者对已发生的事故桥梁进行了调查并分析了事故原因,一方面是独柱墩桥梁的抗倾覆能力比较弱,另一方面是由于重载交通偏心作用下



图1 独柱墩弯桥倾覆事故

Fig.1 the overturning accident of single-pilar pier curved girder bridge

产生的倾覆效应过大^[3-12]。尽管各学者对于独柱墩曲线梁桥的倾覆机理仍有不同看法,但对于桥梁倾覆时主梁绕某一轴线进行转动形成了统一的认识,而分歧点集中于倾覆破坏是基于刚体转动还是变形体转动^[6, 13-17],如图2所示。

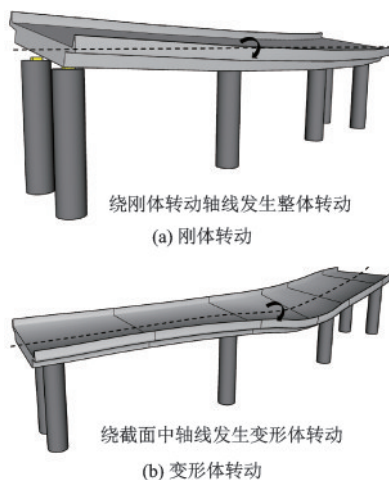


图2 独柱墩弯桥倾覆机理

Fig.2 Overturning mechanism of single-pilar pier curved girder bridge

针对不同的倾覆机理和破坏模式,学者们也提出了不同的桥梁倾覆计算方法。主要有基于刚体转动理论的简化计算方法(以下简称简化方法)、考虑变形体转动和支座尺寸的实用计算方法(以下简称实用方法)以及2018版《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[18]中的计算方法(以下简称规范方法)等。各种方法均有其特点和适用性。

简化方法以刚体转动理论为基础,首先选择倾覆轴,然后分别考虑稳定力矩和倾覆力矩,当稳定力矩与倾覆力矩的比值较小时,桥梁被认定为有倾覆风险^[16, 19-20]。该方法概念明确,计算简单快速,但没有考虑主梁的变形能力,会带来一定误差,并且倾覆轴的选取还需进行大量计算。实用方法考虑主梁变形能力,将倾覆轴线确定为上部结构的轴线,同时考虑独柱墩单支承处支座对稳定效应的贡献,将倾覆轴线向倾覆侧进行偏移^[14-15, 17]。该方法虽能考虑主梁变形能力,但未考虑桥梁倾覆过程中刚体转动的影响。规范方法采用支座失效法,首先计算移动荷载作用下的支反力,然后结合支座间距计算桥梁抗倾覆稳定系数。目前桥梁抗倾覆设计及验算均按照此方法进行,其本质上基于变形体转动理论,适用范围较广,但其计算过程不适合于批量弯桥的程序化快速验算。

面对重载交通(以下特指大件运输车辆)待通行线路上已建的大量独柱墩桥梁,如何快速评价其倾覆风险并采取相应措施避免桥梁倾覆事故的发生成为亟需解决的难题。本文在已有研究基础上,对抗倾覆简化计算方法进行改进,考虑车辆转弯过程中的车轮轨迹确定最不利倾覆轴线,然后对倾覆轴线进行偏移修正以考虑主梁变形能力对恒载稳定效应的降低,并针对大件运输车辆通行验算需求,建立独柱墩桥梁倾覆风险程序化快速预测方法。

1 简化计算方法及改进思路

1.1 简化方法

简化计算方法以刚体转动理论为基础,认为桥梁发生倾覆时是绕某两个支座形成的轴线进行刚体转动。计算时首先确定桥梁倾覆轴,确定原则为:倾覆轴外侧不存在其他支座^[21],根据桥梁弯曲程度不同,倾覆轴的选取存在三种情况:(1)两个梁端外侧支座连线;(2)梁端外侧支座与中墩支座共线;(3)两个中墩支座连线或梁端外侧支座与中墩支座连线^[22],如图3所示。

倾覆轴确定后,考虑桥梁自重效应和活载效应。如图4所示,位于倾覆轴外侧(阴影区域)桥面部分的自重作用为失稳效应 S_{bk1} ,倾覆轴内侧桥面部分的自重作用为稳定效应 S_{bk2} ^[19]。活载加载时将其布置在桥梁最不利位置,使其对倾覆轴产生的倾

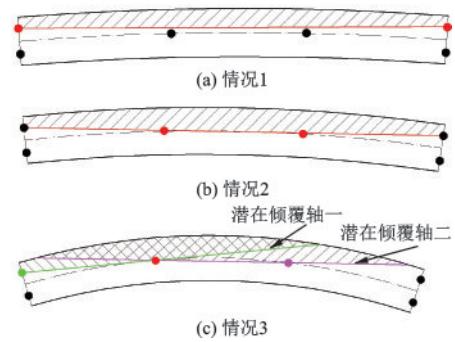


图3 倾覆轴选取

Fig.3 Selection of overturning axis

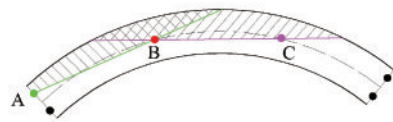


图4 倾覆轴计算理论

Fig.4 Overturning axis caculation theory

覆力矩最大^[23],即失稳效应 S_{sk} 最大。

自重和活载的作用效应计算完成后,按照式

(1)计算抗倾覆稳定能力 k_q ^[24]:

$$k_q = \frac{S_{bk2} - S_{bk1}}{S_{sk}} \quad (1)$$

1.2 改进思路

采用上述简化计算方法进行独柱墩桥梁倾覆计算时存在两个问题,第一是潜在的倾覆轴不止一条,针对不同的倾覆轴,计算结果和结论并不相同,因此实际实施时需进行多次重复计算以确定最不利结果;第二为简化计算方法,以主梁的刚体转动理论为基础,其仅适用于受主梁变形影响较小的桥梁,而对于半径及跨径较大、跨数较多的连续箱梁桥,主梁的变形能力不可忽略,这将给计算结果带来一定的误差。

针对倾覆轴的选取,利用质心加载的方式,首先建立桥梁平面几何模型,确定潜在的倾覆轴;然后计算桥梁质心坐标,并确定桥梁质心到各潜在倾覆轴的距离;其次确定出车辆通过桥梁时的质心轨迹以及车辆质心距各潜在倾覆轴的最大距离;最后引入稳定因子以确定最不利倾覆轴线。

考虑第二个问题时,对倾覆轴线两端点进行偏移以达到减小恒载稳定效应的目的,并通过分析影响主梁变形能力的因素,确定倾覆轴线的偏移量。

2 改进的抗倾覆计算方法

2.1 质心法确定最不利倾覆轴线

按照式(1)的计算原理,桥梁抗倾覆能力用稳定效应与失稳效应的比值来表征。桥梁的稳定效应是由自重产生的,对于某一特定的桥梁,其抗倾覆能力主要取决于桥梁恒载(包括一期和二期恒载)。桥梁恒载对倾覆轴产生的稳定效应可通过主梁自重 g_B 与主梁质心到倾覆轴的距离 d_B 的乘积计算得到。而失稳效应仅由活载作用产生,大件运输车辆具有单车质量重、车身尺寸大等特点,一般均为单车过桥。因此,大件运输车辆产生的失稳效应也可通过车辆质心到倾覆轴的距离 e 与车辆总重 g_C 的乘积计算得到。故可采用式(2)表征桥梁的抗倾覆稳定能力 k_c (为与简化方法计算的抗倾覆稳定能力 k_q 进行区分,后续将改进方法计算得到的抗倾覆稳定能力记为 k_c):

$$k_c = \frac{g_B d_B}{g_C e} \quad (2)$$

由式(2)可知,对于特定的大件运输车辆,桥梁的抗倾覆稳定能力仅与 d_B/e 有关,引入稳定因子 $\eta = d_B/e$ 。因此,确定最不利倾覆轴时,通过计算各潜在倾覆轴的 η 值,选取 η 值最小时对应的倾覆轴即为最不利倾覆轴。

2.1.1 主梁质心到倾覆轴距离的确定

以典型的3跨独柱墩曲线梁桥为例进行分析。如图5所示,梁端为双支承,跨中为独柱墩单支承, O 点为曲线梁桥的圆心位置,将主梁质量集中于桥梁轴线处,则可计算出主梁质心坐标 $M(x_M, y_M)$:

$$x_M = \frac{\int_{l_s} q_g(s) y ds}{g_B} = \frac{\int_0^\alpha R^2 q_g(s) \cos x dx}{\int_{l_s} q_g(s) ds} \quad (3)$$

$$y_M = \frac{\int_{l_s} q_g(s) x ds}{g_B} = \frac{\int_0^\alpha R^2 q_g(s) \sin y dy}{\int_{l_s} q_g(s) ds} \quad (4)$$

式中, R 为桥梁半径; g_B 为主梁自重, $g_B = \int_{l_s} q_g(s) ds$, $q_g(s)$ 为主梁的线自重集度,根据主梁截面和材料重度计算,并考虑桥面铺装和栏杆等二期恒载; l_s 为桥梁全长; α 为主梁对应的圆心角。

AB 和 BC 为潜在的两条倾覆轴,其在坐标平面

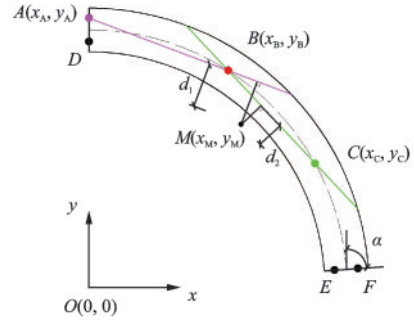


图5 主梁质心位置计算

Fig.5 Centroid position calculation of main beam

内的直线斜率分别为:

$$k_1 = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A}, k_2 = \frac{y_C - y_B}{x_C - x_B} \quad (5)$$

则主梁质心 M 至倾覆轴 AB 、 BC 的距离分别为:

$$d_1 = \frac{|k_1 x_M - y_M + y_B - k_1 x_B|}{\sqrt{k_1^2 + (-1)^2}} \quad (6)$$

$$d_2 = \frac{|k_2 x_M - y_M + y_C - k_2 x_C|}{\sqrt{k_2^2 + (-1)^2}} \quad (7)$$

2.1.2 车辆质心到倾覆轴距离的确定

(1) 车辆弯道行驶状态分析

大件运输车辆产生的失稳效应与车辆在桥面行驶时车轮的位置密切相关,现考虑大件车转弯过程中车轮的轨迹。典型的大件运输车辆为半挂车,由牵引车部分和挂车部分组成。半挂车在弯桥行驶时,牵引车先转过一定角度 δ ,并保持该角度以恒定的速度继续行驶, $\delta = \arctan(l_1/R_L)$;挂车通过牵引销的带动,与牵引车轴线产生折角 θ 。转弯达到稳定状态时牵引车做半径为 R_1 的圆周运动,挂车做半径为 R_2 的圆周运动, R_L 为车辆转弯半径, θ 达到最大值并保持稳定^[25]: $\theta_{\max} = 2\arctan R_L(2/l_2 - A)$,其中, $A = \sqrt{(1/l_2)^2 - (1/R_L)^2}$, l_1 为牵引车前轴至牵引销的距离, l_2 为牵引销至挂车后轴的距离,如图6所示。

大件车产生的失稳效应仍然可通过大件车质心到倾覆轴的距离 e 与车重的乘积进行计算。而大件车在弯桥行驶达到稳定状态时,各轮的轨迹均为圆弧,车辆质心的轨迹也为一圆弧。

(2) 车辆质心轨迹半径

如图7所示, C_1 和 C_2 分别为牵引车和挂车的质心, C 为整车质心。

a_1 和 a_2 分别为牵引车质心 C_1 和挂车质心 C_2 到牵引销的距离(图中所示为水平向距离):

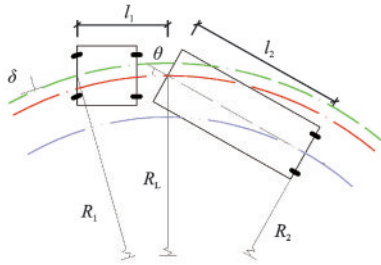


图6 车辆转弯状态

Fig.6 Turning state of vehicle

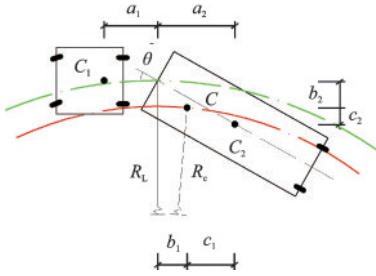


图7 转弯稳定状态

Fig.7 Turning stable state of vehicle

$$a_1 = \frac{\sum P_{1i} d_{1i}}{P_1} \quad (8)$$

$$a_2 = \frac{\sum P_{2j} d_{2j}}{P_2} \cos \theta \quad (9)$$

式中, θ 为转弯稳定状态时挂车轴线与牵引车轴线的最大折角; P_1 和 P_2 分别为牵引车和挂车的总轴重, $P_1 = \sum P_{1i} (i=1 \sim n, n$ 为牵引车总轴数), $P_2 = \sum P_{2j} (j=1 \sim m, m$ 为挂车总轴数), P_{1i} 和 d_{1i} 分别为牵引车第 i 个轴的轴重和该轴到牵引销的距离; P_{2j} 和 d_{2j} 分别为牵引车第 j 个轴的轴重和该轴到牵引销的距离(图8)。 c_1 和 c_2 分别为整车质心 C 到挂车质心 C_2 的水平和竖直向距离:

$$c_1 = \frac{P_1(a_1 + a_2)}{P_1 + P_2} \quad (10)$$

$$c_2 = \frac{P_1 a_2 \sin \theta}{P_1 + P_2} \quad (11)$$

b_1 和 b_2 分别为整车质心 C 到牵引销的水平和竖直向距离: $b_1 = a_2 - c_1$, $b_2 = a_2 \cos \theta - c_2$ 。则质心 C 到圆心 O 的距离 $R_c = \sqrt{(R_L - b_2)^2 + b_1^2}$ 即为车辆质心轨迹的半径。

(3) e 的确定

活载最不利工况下, 大件运输车辆沿桥梁最外侧行驶, 车轴中心与桥梁轴线距离为 d_c , 此时车辆的转弯半径为: $R_L = R + d_c$, R 为桥梁半径; 质心半径

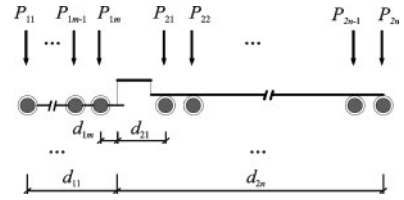


图8 大件车轴重信息

Fig.8 Axle weight information of customized transport vehicle

为 R_c , 如图9所示。对于第 i 条潜在倾覆轴而言(以倾覆轴 BC 为例), 车辆重心至倾覆轴的最大偏心距为:

$$e_i = R_c - h_i \quad (12)$$

式中, h_i 为圆心至该倾覆轴的距离, $h_i = |y_i - k_i x_i| / \sqrt{k_i^2 + (-1)^2}$, k_i 为该倾覆轴的斜率, x_i, y_i 分别为该倾覆轴端点的 x, y 向坐标。

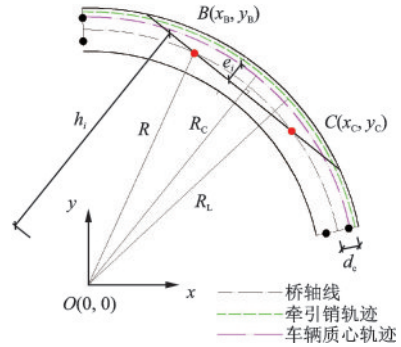


图9 最不利工况大件车布置

Fig.9 Layout of customized transport vehicle under the most adverse conditions

2.1.3 最不利倾覆轴确定及抗倾覆稳定能力计算

通过比较各倾覆轴对应的稳定因子 η_i 的大小, 选取各 η_i 中最小值对应的倾覆轴作为最不利倾覆轴。

$$\eta = \min [\eta_i] = \min [d_i / e_i] \quad (13)$$

最终桥梁在大件运输车辆荷载作用下的抗倾覆稳定能力为:

$$k_c = \frac{g_B}{g_C} \eta = \frac{g_B}{P_1 + P_2} \min [d_i / e_i] \quad (14)$$

2.2 基于变形体转动的倾覆轴线位置修正

桥梁发生倾覆破坏时将经历三个阶段:(1)主梁在竖向荷载作用下将发生挠曲变形, 受偏心荷载作用时还会绕主梁轴线发生扭转变形, 此时桥梁呈现出变形体转动的特征, 且变形体转动程度与弯桥

的抗扭刚度密切相关;(2)随着偏心荷载作用的增大,主梁的变形达到极限,桥梁开始围绕某一轴线发生整体转动,此时呈现出刚体转动的特征;(3)偏心荷载继续增加,主梁的转角达到滑动临界角而发生整体滑动。桥梁倾覆是刚体转动和变形体转动的叠加^[17]。故可将第二阶段主梁开始发生整体转动作为桥梁倾覆危险临界状态,则简化计算方法本质上是针对桥梁倾覆第二阶段进行验算。然而第一阶段主梁的变形会使桥梁参与抵抗失稳效应的恒载作用减小,桥梁的倾覆轴线也将与原刚体转动轴线有所偏移,其实际位置受主梁变形程度影响。

2.2.1 倾覆危险临界状态下的抗倾覆稳定能力

通过建立 ABAQUS 实体有限元模型分析独柱墩弯桥倾覆过程,当梁端外侧支座与中墩支座共线时(图 3(b)),桥梁倾覆过程中主梁的扭转变形较小,倾覆轴线与刚体转动轴线重合,此时倾覆轴线位置无需偏移修正。针对上述桥梁模型,按照倾覆最不利工况布置大件车荷载,采用分级加载的方法进行加载,当主梁的扭转位移迅速增大^[7],扭转角达到 0.02 Rad 时,主梁扭转位移趋于发散,桥梁达到倾覆危险临界状态,此时可确定出临界荷载,如图 10 所示,其临界荷载系数为 0.8。根据临界荷载计算出桥梁抗倾覆稳定能力为 0.993,即说明当倾覆效应与稳定效应相等时,桥梁将处于倾覆危险临界状态。图 11 为箱梁发生刚体转动时的位移云图。

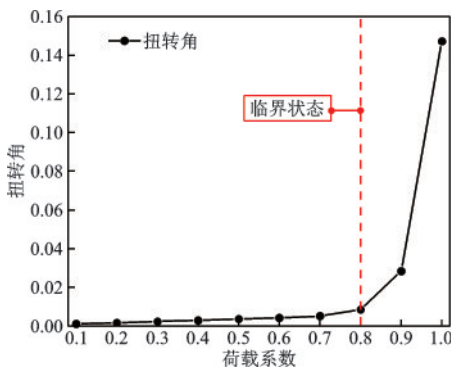


图 10 主梁扭转位移随荷载变化

Fig.10 Torsional displacement of main girder under different loads

2.2.2 倾覆轴修正方法

根据前述内容,当桥梁处于倾覆危险临界状态时,倾覆效应与稳定效应相等。针对倾覆轴为其他形式的独柱墩弯桥,较大的主梁扭转变形使实际的倾覆轴位置发生偏移,确定倾覆轴位置时,采用前

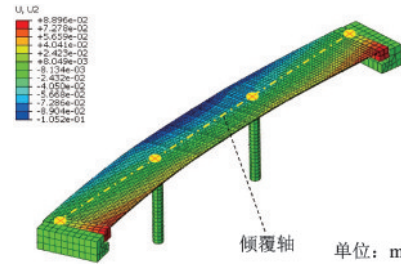


图 11 箱梁发生刚体转动时的位移云图

Fig.11 Displacement nephogram of box girder when rigid body rotation occurs(m)

述分级加载的方法,首先确定出倾覆临界荷载,并以刚体转动轴作为倾覆轴分别计算出稳定效应以及临界荷载作用下的倾覆效应,然后对刚体转动轴进行偏移使稳定效应与倾覆效应相等,便可确定出桥梁发生倾覆时的倾覆轴位置。

刚体转动轴线是由两个支座支承点的连线确定的,偏移时将转动轴线两个端点沿径向进行偏移,偏移量为 γl_d , l_d 为双支承的支座间距, γ 定义为偏移系数。由于弯桥存在弯扭耦合效应,弯桥的抗扭刚度受弯桥半径、支座布置形式等因素影响很大。弯桥半径较小时,抗扭刚度较大;两个双支承间的跨数越多,则抗扭刚度越小。综合以上考虑,针对半径范围为 50~600 m、单跨跨径为 20~40 m 以及不同支座布置形式(抗扭跨数为 2、3 和 4 跨)的桥梁进行 ABAQUS 有限元建模,分析其倾覆过程,确定偏移系数的取值。对得到的不同结构参数桥梁的偏移系数进行分析,最终偏移系数可根据表 1 进行经验取值,表中 n_s 为抗扭跨数(桥梁两个双支承间的跨数), $c=R/100$;转动轴线形式受半径和双支承的支座间距共同影响,如图 3 所示,情况 2 无需进行修正故表中未列出。

刚体转动轴线进行偏移后,其端点坐标发生变化,2.1 节中相应的端点均采用偏移后的坐标值:

$$x' = x - \gamma l_d \cos \beta \quad (15)$$

$$y' = y - \gamma l_d \sin \beta \quad (16)$$

式中, x' 和 y' 为偏移后倾覆轴线端点坐标值; β 为支点位置处截面径向与水平向夹角,如图 12 所示。

3 改进前后计算结果对比

3.1 桥梁模型及大件车信息

根据某省高速公路大件运输车辆统计数据,采

表 1 偏移系数经验取值

Tab.1 Empirical value of deviation ratio

n_s	转动轴线形式	
	情况 1	情况 3
2	$R < 400: -\frac{11}{400}c^2 + \frac{409}{2000}c - \frac{37}{400}$	$-\frac{3}{10}c^2 + \frac{43}{200}c + \frac{71}{2500}$
	$R \geq 400: \frac{41}{5000}c - \frac{156}{625}$	
3	$-\frac{41}{2500}c^2 + \frac{233}{1250}c - \frac{53}{250}$	$\frac{21}{250}c^2 - \frac{3211}{10000}c + \frac{751}{2500}$
4	$-\frac{61}{10000}c^2 + \frac{133}{1250}c - \frac{511}{2500}$	$\frac{79}{1250}c^2 - \frac{91}{250}c + \frac{117}{200}$

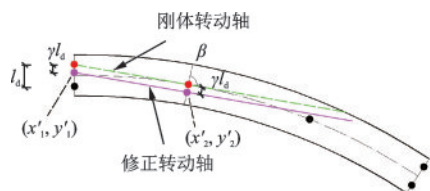


图 12 倾覆轴线偏移修正

Fig.12 Deviation of overturning axis position

用通行频次最高的 192 吨大件运输车辆为例进行计算。车辆模型及轴重信息如图 13 所示。桥梁模型选取高速互通枢纽匝道和城市立交中常见的三跨、四跨独柱墩弯桥,具体跨径及支承等信息见表 2,表中支承形式“2”表示双支承,“1”表示独柱墩单支承,例如“2-1-1-2”表示梁端双支承、跨中单支承的三跨独柱墩弯桥。桥梁横断面信息如图 14 所示,根据横断面信息,同时将二期恒载作用考虑为均布荷载,则桥梁自重线集度为 104 kN/m。

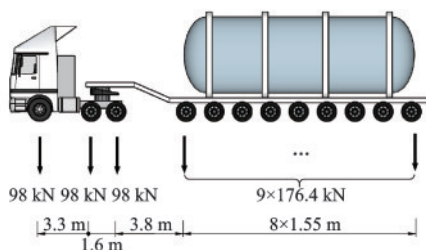


图 13 典型大件车轴重信息

Fig.13 Axle weight information of typical customized transport vehicle(m)

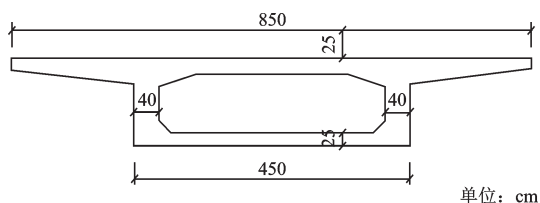


图 14 桥梁横断面信息

Fig.14 Bridge cross section information(cm)

表 2 桥梁信息

Table 2 Bridge information

序号	桥梁模型	桥宽/ m	跨径/ m	支承形式	支座间距/ m	半径/ m
1	1	8.5	3×20	2-1-1-2	5	100
2	2	8.5	3×20	2-1-1-2	5	200
3	3	8.5	3×20	2-1-1-2	5	300
4	4	8.5	3×20	2-1-1-2	5	400
5	5	8.5	3×20	2-1-1-2	5	600
6	6	8.5	4×20	2-1-1-1-2	5	100
7	7	8.5	4×20	2-1-1-1-2	5	200
8	8	8.5	4×20	2-1-1-1-2	5	300
9	9	8.5	4×20	2-1-1-1-2	5	400
10	10	8.5	4×20	2-1-1-1-2	5	600
11	11	8.5	2×20	2-1-2	5	50
12	12	8.5	2×20	2-1-2	5	80
13	13	8.5	2×20	2-1-2	5	100
14	14	8.5	2×20	2-1-2	5	200
15	15	8.5	2×20	2-1-2	5	300

3.2 计算结果分析

k_c 和 k_q 的计算步骤较为繁琐、计算量较大,但运算类型简单,且重复性高,利用 MATLAB 良好的交互性和灵活的编程语法可以方便地编制出计算程序。采用编制的 MATLAB 程序计算表 2 中桥梁模型的 k_c 和 k_q 值,计算结果如图 15 所示,随着半径的增加以及支承形式的变化,大件车质心和桥梁质心到刚体转动轴线的距离均会逐渐减小,而前者会率先接近刚体转动轴线,其值也将减小至较小的范围,桥梁的失稳效应被过度降低,这会使 k_q 值迅速增加,远远超过正常值,已无意义,如模型 5 和 15,其 k_q 值结果图中未示出。

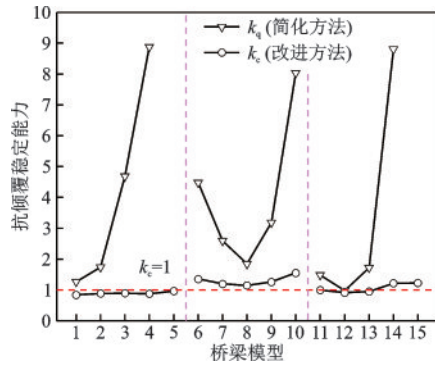


图 15 抗倾覆稳定能力计算结果

Fig.15 the calculation result of anti-overturning stability capability

主梁的变形能力会使实际倾覆轴线向内侧移动。改进方法考虑自重稳定效应降低的同时不会过度降低车辆的失稳效应,计算出的 k_c 值不会产生剧烈变化,变化趋势较为平稳,且均小于 k_q 。根据ABAQUS实体模型的计算结果,在所述大件车荷载作用下,桥梁1至5,以及11、12和13会发生倾覆破坏,而 k_c 计算值为[0.844, 0.996];其他桥梁未发生倾覆破坏, k_c 计算值为[1.149, 1.553];根据 k_c 可以确定出桥梁是否有倾覆的风险;而 k_q 值的变化范围较大,其对于倾覆风险性不同的桥梁没有明显的区分。可见, k_c 对于桥梁倾覆风险的表征能力更强,采用第2节中的方法对简化方法进行改进具有较好的效果。

4 倾覆风险快速预测流程及实现方法

4.1 倾覆风险判断

为确定在给定的大件运输车辆荷载作用下桥梁是否存在倾覆风险,采用阈值的方法建立抗倾覆稳定能力 k_c 与倾覆风险间的判断依据。首先需确定抗倾覆稳定能力阈值 $[k_c]$,当桥梁的 k_c 计算值小于阈值 $[k_c]$ 时,认为其倾覆风险高,反之则认为倾覆风险低。通过前述建立的大量ABAQUS实体有限元模型,对其倾覆过程进行分析,根据其倾覆临界荷载计算出的倾覆危险临界状态的 k_c 值,如图16所示,其数值均在1.0附近波动,变化范围为[0.971, 1.072],即说明在倾覆危险极限状态时,桥梁的失稳效应与稳定效应较为接近。而根据2.2节,倾覆危险极限状态处于弯桥倾覆的第二个阶段。此时主梁的变形体转动达到极限,主梁开始围绕倾覆轴发

生刚体转动。改进方法的目标即是针对该状态,找到倾覆轴的正确位置,根据该倾覆轴计算桥梁的稳定效应和失稳效应。而针对刚体转动而言,当失稳力矩与稳定力矩接近或相等时,桥梁也将达到刚体转动极限状态。因此,改进方法的实质即为建立在弯桥倾覆第二阶段的刚体转动理论。再考虑3.2节中的计算结果,对于发生倾覆破坏的桥梁,其 k_c 值最大为0.996,对于未发生倾覆破坏的桥梁,其 k_c 值最小为1.149。根据以上分析,抗倾覆稳定能力阈值可初步取为1.0。

而考虑到倾覆危险状态的下一阶段即为桥梁的整体倾覆失稳破坏,将抗倾覆稳定能力阈值取值为1.0过于接近失稳状态,同时考虑到计算误差,将抗倾覆稳定能力阈值取为较保守值1.10。即,针对改进方法而言,可建立如下的倾覆风险评判准则:

$$k_c \geq [k_c] \quad (17)$$

式中, k_c 为由改进方法计算得到的桥梁抗倾覆稳定能力; $[k_c]$ 为抗倾覆稳定能力阈值, $[k_c]=1.10$ 。

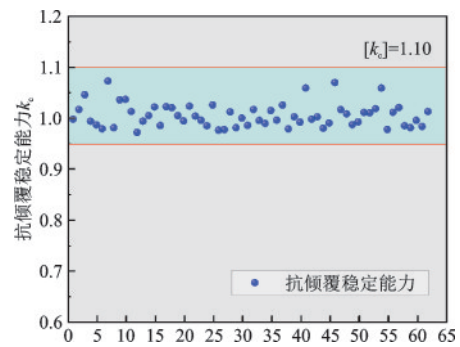


图 16 倾覆危险临界状态 k_c 值

Fig.16 k_c value of hazard critical state for overturning

4.2 预测流程及程序实现

为实现针对大件运输车辆荷载作用下海量独柱墩弯梁桥的倾覆风险流程式快速预测,需保证在有限且简洁的输入信息下得出准确的预测结果。采用前述改进的简化方法,首先,输入桥梁和车辆的相关信息;然后根据输入信息生成桥梁平面几何模型;其次,计算桥梁重心位置以及车辆质心作用半径,根据桥梁结构参数确定偏移修正后的最不利倾覆轴线;最后计算最不利倾覆轴线对应的抗倾覆稳定能力 k_c 。预测流程如图17所示。

在3.2节编制的 k_c 计算程序基础上,建立弯桥倾覆风险快速预测算法,并采用程序实现,输入信息为待通行线路上的桥梁信息 $INFO_B$,包括跨径信

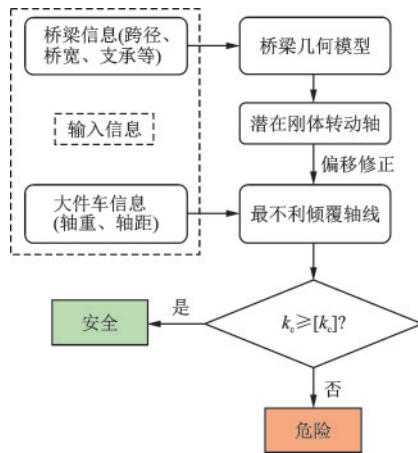


图 17 倾覆风险预测流程

Fig.17 Process of overturning risk prediction

息 sp 、支承形式 sup 、支座间距 d_{sup} 、桥梁半径 R 、桥宽 D 和自重线密度函数 $q(s)$; 车辆信息 $INFO_C$ 包括牵引车的各轴重 P_i^t 及轴距 d_i^t 和挂车的各轴重 P_i^g 及轴距 d_i^g 。算法运行后可以得到所有弯桥的 k_c 值, 若各 k_c 值均大于 $[k_c]$, 则针对独柱墩弯桥倾覆事故而言, 大件车可安全通行; 若存在不满足要求的 k_c , 则待通行线路上存在倾覆风险较大的弯桥, 大件车通行有风险。算法伪代码如下:

算法 1: 弯桥倾覆风险快速预测算法

输入: 桥梁信息 $INFO_B = \{[sp, sup, d_{sup}, R, D, q(s)], \dots\}$; 大件车信息 $INFO_C = \{[P_1^t, P_2^t, \dots, P_n^t], [d_1^t, d_2^t, \dots, d_n^t], [P_1^g, P_2^g, \dots, P_m^g], [d_1^g, d_2^g, \dots, d_m^g]\}$ 。

- 1: 初始化 $CRITERION \leftarrow [1]$
- 2: 初始化 $i \leftarrow 1$
- 3: 由 $INFO_B$ 生成桥梁几何模型 $MODEL_B$
- 4: for $INFO_B$ 中的每一个桥梁信息 do
- 5: 从 $INFO_B$ 获取桥梁自重 g_B
- 6: 从 $INFO_C$ 获取车辆自重 g_C
- 7: 由 $MODEL_B$ 计算潜在倾覆轴 $AXIS$
- 8: for $AXIS$ 中的每一个潜在倾覆轴 do
- 9: 由 $INFO_B$ 计算偏移系数 γ_1 和 γ_2
- 10: 修正偏移各潜在倾覆轴并更新 $AXIS$
- 11: $\eta_i = h_i / e_i$
- 12: $j = j + 1$
- 13: end for
- 14: $\eta = \min(\eta_i)$
- 15: $k_c = \eta \cdot g_B / g_C$
- 16: if $k_c \leq [k_c]$ then
- 17: $CRITERION_i \leftarrow 0$

- 18: end if
- 19: $i = i + 1$
- 20: end for
- 21: if $SUM(CRITERION) \leq i - 1$ then
- 22: 通行有风险!
- 23: end if

针对大件车待通行线路上的大量独柱墩弯桥, 上述算法可快速确定出具有倾覆危险的桥梁, 以对大件车通行性验算提供依据。而包括规范方法在内的现有独柱墩弯桥倾覆验算方法均需对每一个桥梁建立有限元模型或者进行复杂的结构计算, 使大件车通行审批效率大大降低。上述方法具有极高的计算效率。

5 结 语

(1) 独柱墩弯桥发生倾覆破坏时围绕倾覆轴线发生变形体和刚体转动, 传统的刚体转动理论未考虑主梁的变形能力而放大了桥梁自重的稳定效应。

(2) 大件运输车辆以稳定转弯状态通过弯桥时, 质心轨迹为一圆弧。通过计算桥梁质心位置坐标和车辆质心轨迹半径, 采用质心加载的方式可确定最不利倾覆轴线。

(3) 以弯桥倾覆过程为基础, 针对弯桥倾覆第二阶段, 提出的通过对刚体转动轴线端点进行向内侧偏移修正的方法, 可以有效考虑主梁变形能力对桥梁自重产生的稳定效应的削减作用, 减小桥梁抗倾覆稳定能力的计算误差。

(4) 计算出桥梁抗倾覆稳定能力 k_c 值并与阈值 $[k_c]$ 进行比较可判断桥梁是否有倾覆风险; 通过对大量桥梁进行倾覆过程分析, 取 $[k_c]$ 为 1.10。

参考文献:

- [1] 吕平. 独柱墩连续梁桥抗倾覆能力影响因素研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2021.
Lyu P. Research on influencing factors of anti-overturning capability of single-pillar pier continuous girder bridge [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2021. (in Chinese)
- [2] 张利鹏. 大件运输车辆荷载下独柱墩曲线梁桥抗倾覆稳定性研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
Zhang L P. Anti-overturning stability research of curved beam bridge with single column pier under overloaded customized transport vehicle load [D]. Xi'an: Chang'an

- University, 2020.(in Chinese)
- [3] Shi X F, Zhou Z J, Ruan X. Failure analysis of a girder bridge collapse under eccentric heavy vehicles[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(12): 05016009.
- [4] Xiong W, Cai C S, Kong B, et al. Overturning-collapse modeling and safety assessment for bridges supported by single column piers[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(11): 04017084.
- [5] Shi X F, Zhen C, Ma H Y, et al. Failure analysis on a curved girder bridge collapse under eccentric heavy vehicles using explicit finite element method: case study[J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23 (3) : 05018001.
- [6] Song T Y, Deng Q E, Li G P. Collapse mechanism and full-range analysis of overturning failure of continuous girder bridges [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 2021: 1-14.
- [7] 李翠华, 杨利斌, 傅志华, 等. 无锡市 312 高架桥倾覆事故分析 [J]. 工程力学, 2021, 38(9): 203-211.
Li C H, Yang L B, Fu Z H, et al. Forensic analysis of the Wuxi 312 viaduct overturning collapse[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(9): 203-211. (in Chinese)
- [8] 彭卫兵, 程波, 史贤豪, 等. 独柱墩梁桥倾覆破坏机理研究 [J]. 自然灾害学报, 2014, 23(5): 98-106.
Peng W B, Cheng B, Shi X H, et al. Research on mechanism of overturning failure of single column pier beam bridge[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23 (5): 98-106. (in Chinese)
- [9] Fan Y X, Zhu J, Pei J J, et al. Analysis for yangmingtan bridge collapse [J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 56: 20-27.
- [10] Xu F Y, Zhang M J, Wang L, et al. Recent highway bridge collapses in china review and discussion[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30 (5): 04016030.
- [11] Wardhana K, Hadipriono F C. Analysis of recent bridge failures in the united states[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2003, 17 (3) : 144-150.
- [12] Deng L, Wang W, Yu Y. State-of-the-art review on the causes and mechanisms of bridge collapse [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30 (2): 04015005.
- [13] Peng W B, Zhao H, Dai F, et al. Analytical method for overturning limit analysis of single-column pier bridges [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2017, 31(4) : 04017007
- [14] 王兵见, 赵航, 张豪, 等. 独柱墩梁桥横向稳定计算理论与验证 [J]. 中国公路学报, 2017, 30(9): 93-100.
- Wang B J, Zhao H, Zhang H, et al. Lateral stability calculation theory and verification of single-column girder bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(9): 93-100. (in Chinese)
- [15] 彭卫兵, 徐文涛, 陈光军, 等. 独柱墩梁桥抗倾覆承载力计算方法 [J]. 中国公路学报, 2015, 28(3): 66-72.
Peng W B, Xu W T, Chen G J, et al. Calculation method for anti-overturning capacity of single column pier girder bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(3): 66-72. (in Chinese)
- [16] 吕毅刚, 饶攀, 韩伟威, 等. 独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆实用计算方法研究 [J]. 交通科学与工程, 2021, 37(3): 35-40.
Lyu Y G, Rao P, Han W W, et al. Research on the practical calculation method of anti-overturning of the curved box girder bridge with single column pier [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37 (3): 35-40. (in Chinese)
- [17] 彭卫兵, 朱志翔, 陈光军, 等. 梁桥倾覆机理、破坏模式与计算方法研究 [J]. 土木工程学报, 2019, 52 (12): 104-113.
Peng W B, Zhu Z X, Chen G J, et al. Research on overturning failure mode of beam bridges and applicability of calculation method [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(12): 104-113. (in Chinese)
- [18] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [19] 曹景, 刘志才, 冯希训. 箱形截面直线桥及曲线桥抗倾覆稳定性分析 [J]. 桥梁建设, 2014, 44(3): 69-74.
Cao J, Liu Z C, Feng X X, et al. Analysis of overturning stability of straight and curved bridges with box sections [J]. Bridge Construction, 2014, 44 (3) : 69-74. (in Chinese)
- [20] 彭卫兵, 潘若丹, 马俊, 等. 独柱墩梁桥倾覆破坏模式与计算方法研究 [J]. 桥梁建设, 2016, 46(2): 25-30.
Peng W B, Pan R D, Ma J, et al. Study of overturning failure modes and anti-overturning calculation methods for single-column pier beam bridges [J]. Bridge Construction, 2016, 46(2): 25-30. (in Chinese)
- [21] 宫亚峰, 何钰龙, 谭国金, 等. 三跨独柱连续曲线梁桥抗倾覆稳定性分析 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(1): 113-120.
Gong Y F, He Y L, Tan G J, et al. Anti-overturning stability analysis for three-span continuous curved girder bridge with single column pier [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2018, 48(1): 113-120. (in Chinese)

(本文编辑: 周小潭)

(下转第 501 页)